

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.44    NO.1    March 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 1 号 (Vol. 44, No. 1), 2005年3月 (March 2005)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 内湾干潟海域における 3次元凝集性土砂輸送およびそれに伴う地形変動のモデリング  
.....内山 雄介 ..... 3  
(Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats  
..... Yusuke UCHIYAMA)
2. 長周期波対策護岸構造の最適化に関する検討  
.....平石 哲也 .....23  
(Optimization of Long Period Wave Absorbing Sea Wall  
..... Tetsuya HIRAISHI)
3. 消波ブロックによるケーソン壁面押し抜きせん断破壊に関する研究  
.....有川 太郎・池辺 将光・大寄 菜々子・黒田 豊和・  
織田 朋哉・下迫 健一郎 .....43  
(Study on punching shear failures of caisson wall caused by the impulsive force of dissipating blocks  
..... Taro ARIKAWA, Masamitsu IKEBE, Nanako OSAKI, Toyokazu KURODA,  
Tomoya ORITA, Kenichiro SHIMOSAKO)

## 長周期波対策護岸構造の最適化に関する検討

平石 哲也\*

### 要 旨

長周期波による港湾の係留索の切断事故や荷役障害を抑止するためには、防波堤等による入射長周期波の遮蔽だけでなく、港内における長周期波の反射率を低減し、増幅による波高増大を抑えることが必要である。ここでは、両面スリットケーソンの陸側に碎石消波層を有する長周期波対策護岸を有効に活用するために、粒径の異なる碎石層を組み合わせ、最小の幅で最も消波効果の高い最適構造を数値解析と模型実験で検討した。数値解析では、消波層を構成する碎石の形状を考慮できる材料係数を導入した圧力損失式を用いた。模型実験と数値解析により、粒径の異なる碎石層を組み合わせて、長周期波の反射率は0.7以下にできることが判明した。

キーワード：長周期波，長周期波対策護岸，透水層模型実験，直接流体解析法，数値波動水路

---

\* 海洋・水工部波浪研究室長  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

## Optimization of Long Period Wave Absorbing Sea Wall

Tetsuya HIRAIISHI\*

### Synopsis

Long period waves originally induced in the bounded offshore infragravity waves mainly approach to coastal harbors as free long waves. Large vessels moored in the elastic hawsers are often displaced due to the resonance between the long period waves and mooring system. The cargo handling may be interrupted and the hawsers may be broken when the surging amplitude becomes remarkable.

A new type long period wave absorber has been proposed in order to prevent the amplification of long period waves in harbors. The absorber is composed of a double-face slit caisson and a backside long rubble layer. A series experimental works are done to find the optimum length of porous layer and diameter of rubbles. The experimental results demonstrated that the combination of large and small size rubbles is suitable to the long period wave absorbing sea wall.

A numerical model also is improved to reproduce the wave reflection coefficient of the long period wave absorbing sea wall. The reflection coefficient of long period waves becomes 0.7 according to the numerical and experimental results.

Finally the numerical simulation for ship motion moored at the quay wall with the long period wave absorbing part is carried out. The surging and swaying amplitudes of moored 50000DWT vessel become smaller than the allowable level when the long period wave absorbing sea wall is applied as the quay

**Key Words:** long period waves, long period wave countermeasure, long period wave absorbing sea wall, hydraulic experiment, MARS model, ship motion, mooring system

---

\* Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-468-445042 Fax : +81-468-413888 e-mail:hiraiishi@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	23
1. はじめに .....	27
2. 透水実験による数値解析法の改良 .....	27
2.1 透水係数による材料係数の設定 .....	27
2.2 長周期波の消波層内の変形計算 .....	29
3. 最適構造に関する模型実験 .....	29
3.1 実験模型の構成 .....	29
3.2 反射率の計測結果 .....	30
4. 数値計算による適用性の検討 .....	32
4.1 模型実験による検証 .....	32
4.2 現地への適用性評価 .....	32
5. 長周期波対策護岸による活用事例 .....	33
5.1 長周期波対策護岸の活用 .....	33
5.2 岸壁構造への活用例 .....	33
5.3 港内での長周期波対策護岸活用例 .....	38
6. あとがき .....	39
謝辞 .....	40
参考文献 .....	40
記号表 .....	40

## 1. はじめに

外洋から港湾に侵入する周期数十秒～数分程度の長周期波によって、ナイロン製ロープで岸壁に係留された数千～数万DWTクラスの大型船のサージング運動が共振によって励起され、係留索の切断や荷役障害を引き起こす現象が各地で報告されている。その対策としては、ソフト的な対策として港内長周期波の短期予測とハード対策として沖合防波堤の最適方向への延伸が考えられる。さらに、人工干潟や適切な消波層によって港内における長周期波の反射率を低減させ、増幅を抑止することが有効である。そこで、筆者は国土交通省港湾局と協力して、港湾の長周期波の特性と対策工の考え方を取りまとめ、その方針を2004年8月に“港内長周期波影響評価マニュアル”（沿岸開発技術研究センター、2004）の中で示した。マニュアルの中では、港内に消波層を設置することを勧めており、消波工によって反射率を0.5～0.7程度にすることを目標としている。

具体的に対策工の構造を提示するために、筆者ら（平石・永瀬、2002, 2003）は、港内での長周期波反射対策工として陸側にもスリットを有する両面スリットケーソンと裏込め材（砕石層）を組み合わせた“長周期波対策護岸”を提案して、その特性を数値計算と模型実験で検討してきた。その結果、特定の粒径範囲では、模型値で1m幅以上の消波層を設置することにより、反射率を0.7～0.8にできることを示した。ただし、消波層となる裏込め材の粒径は一定であり、粒径の異なった層を混在させて、より短い幅で大きな消波効果を有する改良型護岸に対して検討していない。本研究では、異なった粒径層を組み合わせた消波層の反射性能を調べ、最小幅で最大効果を有する構造を提案することを目的とした。

さらに、船体が周期十数秒～数十秒程度のうねりや長周期波によって大きな水平運動を生じると、安定な荷役が妨げられ、エネルギー等の安定供給に対するリスクが高くなる。ここでは、改良された護岸や岸壁構造が船体の動揺低減に果たす役割を定量的に評価するために、改良岸壁に係留された船体の動揺量を計算して、改良前の直立岸壁の場合と比較した。ただし、船体の動揺量は初期張力や防舷材反力特性によって大きく変化するので、本報告で示した一例だけで、消波層を応用した岸壁構造が船体動揺対策として十分機能するかどうかについて明確な結論を導くことは難しい。ここでは、反射率を低下させた場合にスウェーイングやサージング振幅がどのように変化するかを試算した一例として理解されたい。

また、活用事例の紹介として港湾の護岸として設置し

た場合の波高変化についても検討した。

## 2. 透水実験による数値解析法の改良

### 2.1 透水係数による材料係数の設定

これまでの数値計算（平石・永瀬、2002）では、消波層内での砕石での圧力損失計算では、等質な構成体を仮定したErgun式を用いてきた。しかし、この手法では、砂礫の種類や形状による損失の差が表現できず、模型実験結果との相違が生じていた。そこで、近藤ら（1983）が異形ブロックなど様々な材料を用いた消波構造物の検討に広く用いられることしめしているDupuit-Forchheimer則を適用することを試みた。Dupuit-forchheimer則による圧力 $p$ の損失は、次式で示される。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = (\alpha + \beta|q|)q \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ および $\beta$ は、消波層内の空隙と材料から求まる係数で、次式で表される。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\mu}{d^2} \quad (2)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (3)$$

また、 $\lambda$ は空隙率、 $q = \lambda u$ で、 $u$ は管内流速である。 $\alpha_0$ および $\beta_0$ は材料係数で、透水試験で求めることができる。なお、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $d$ は、それぞれ流体密度、粘性係数、材料の粒径である。

透水試験は、図-1に示すような造波水路内に仮設した往復流発生装置で行った。往復流発生装置は、電磁流量計で計測したデータをフィードバックしてポンプを回転数を制御することによって一定流量を供給する。後述する反射率測定実験で用いる消波層構成材（工用砕石）は、内径25cm、長さ70cmの塩化ビニル製の円筒試験容器に入れて、往復流装置の管路内に挿入した。円筒試験容器の両端は金網で覆い砕石を固定し、図-1のP1およびP2の位置に圧力計を設置して、2点間の圧力を往復流内で測定した。

実験対象として工場で削岩して製作した3種類の砕石を用いた。図-2(1)に3種類(No.1, No.2, No.3)の粒径加積曲線を示す。No.1は粒径が最も大きい砕石が含まれ、No.3の粒径は小さく、粒径のばらつきも比較的大きくなっている。捨て石防波堤に使用する石材の規格を定めたロックマニュアル(CIRIA, 1991)では、曲線上の85%と15%に相当する粒径 $d_{85}$ および $d_{15}$ の比( $d_{85}/d_{15}$ )を用いて品質

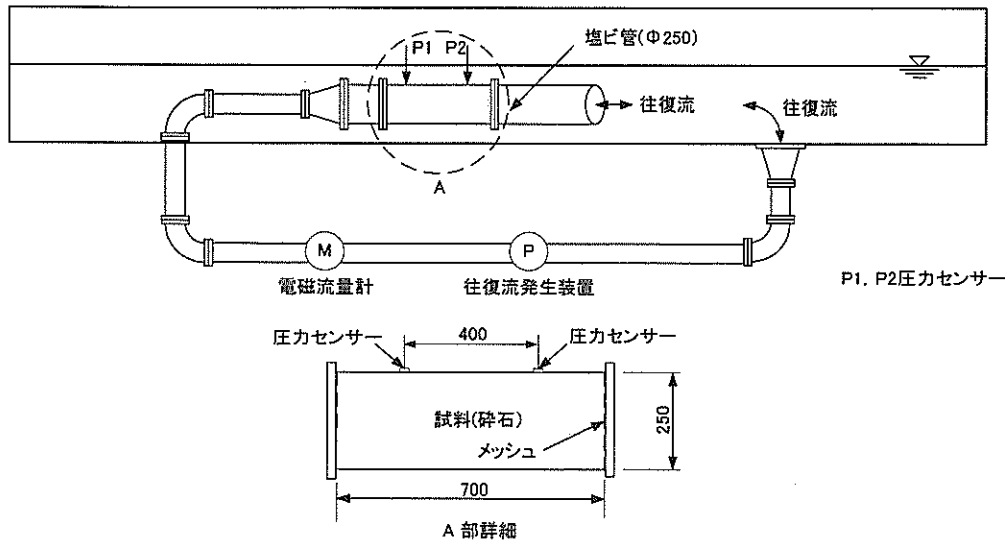
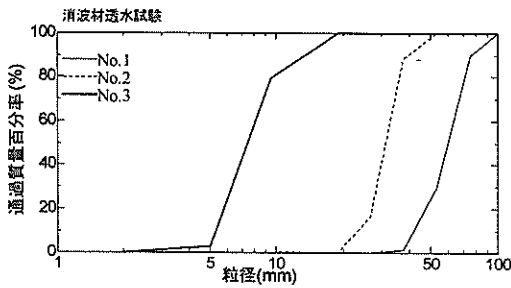


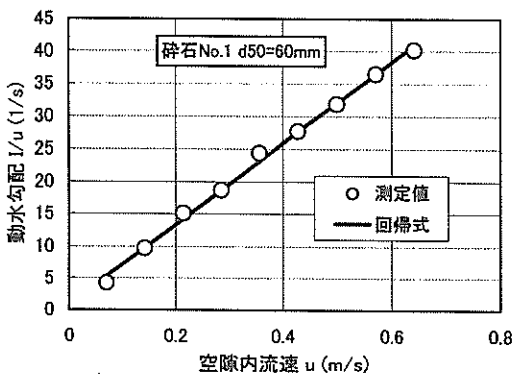
図-1 透水試験での往復流発生装置と試験体配置

表-1 試験碎石と材料係数

種別		No.1	No.2	No.3
粒径	d50(mm)	60	31	7.5
空隙率	$\lambda$ (%)	57.1	49.8	43.1
$\alpha$		0.88	7.91	109
$\beta$		62.38	243.6	1682
材料係数	$\alpha_0$	9880	11378	4732
材料係数	$\beta_0$	2.82	3.73	1.78



(1) 実験碎石の粒度分布



(2) 流速と動水勾配の関係

図-2 透水試験で用いた碎石と試験結果

管理を行っており、 $d_{85}/d_{15}$ が1.5以下の場合には、ほぼ単一粒径の石材と見なしている。本実験で用いた碎石材の $d_{85}/d_{15}$ を求めると、No.1で1.5、No.2で1.1、No.3で2.0となり、No.1およびNo.2は一樣な粒径の石材として見なせる

が、No.3は細粒成分の割合が高くなり、やや不均質な石材になっている。したがって実験結果には、粒径のばらつきによる誤差が含まれるので、代表粒径による整理だけでは不十分な面がある。

粒度分布の解析からNo.1とNo.2に関しては中央粒径を代表粒径として用いることが適切であるので、No.3についても代表粒径としては中央粒径 $d_{50}$ を用いるものとする。なお、代表粒径として、碎石と同じ容積をもつ立方法の辺長 $d_n$ を用いることが前述のロックマニュアルでは推奨されているが、 $d_{n50}$ と $d_{50}$ の相関式( $d_{n50}/d_{50}=0.84$ )が同書には提示されているので、 $d_{50}$ で整理をしても、使用時には換算できる。そこで、本実験では粒度得られた中央粒径 $d_{50}$ を代表粒径として用いる。

粒径加積曲線から推定した中央粒径( $d_{50}$ )と、容器容積と碎石比重( $\rho_s=2.7$ )から算出した空隙率を表-1に示す。空隙率はNo.1が大きく、粒径が小さくなるほど空隙率も小さくなり、流体移動にとって抵抗が大きくなる。図-2(2)に電磁流量計から推定できる空隙内流速と、2点間の圧力差から求めた動水勾配( $I=\rho^{-1}dp/dx$ )の関係を示す。流速と

動水勾配は線形の関係であり、図のような直線回帰式で両者の関係を表すことができる。そこで、式(1)から係数 $\alpha$ および $\beta$ を計算できる。さらに式(2)および(3)から、材料係数 $\alpha_0$ および $\beta_0$ を換算した。表-1には、透水試験から求めた材料係数の値も合わせて示す。材料の特性値である材料係数は、No.1とNo.2の砕石ではほぼ等しい。No.3砕石は他の2種類に比べると、透水層内のエネルギー損失が大きく、No.1およびNo.2に比較して、材料係数が小さな値を取る。この要因の一つとして粒径の不均一性も予想される。

近藤ら(1983)は石の場合に $\alpha_0=800\sim 1500$ 、 $\beta_0=1.8\sim 3.6$ を提案しており、 $\beta_0$ は本実験結果と一致しているが、 $\alpha_0$ は本実験結果より小さい。これは、本実験で用いた工事用の砕石は、丸みが少なく、抗力による圧力損失が自然石より大きいためと考えられる。実際の護岸工事でも機械で砕いた現場砕石を使うため、本透水試験で用いた材料係数を数値解析で用いる。

## 2.2 長周期波の消波層内の変形計算法

長水路内の一端に設置された両面スリットケーソンと裏込め部の消波層における長周期波の変形を解析するモデルは、著者ら(平石・永瀬, 2002)が提案した流体直接解析法を適用した数値波動水路である。モデルでは、数値波動水路の全長は44mで、水深は51cmである。造波境界から水深と波高に対応した孤立波と規則波を与え、時間間隔毎に各格子の流速ならびに流体占有率を計算し、格子内の水面面勾配も考慮して波形変化を求める。両面スリットケーソンは高さ15cmの不透過マウンドに設置し、マウンド上から水面まで同一断面で、スリットの空隙率は50%とした。空間格子間隔は0.5mで断面方向の計算範囲は、スリット柱と空隙部をそれぞれ一対含む範囲に限定している。時間間隔はクーラン数が0.1となるように自動的に調整した。両面スリットケーソンを通過した長周期波について、消波層内で圧力損失を計算する。

流体直接解析法による圧力損失計算の検証は、まず単純な長さ100cm、直径25cmの円筒管路の中に管路両端からそれぞれ15cm内側の位置に長さ70cmの消波層が充填されている場合を流体直接解析法でモデル化して行った。一定流速を与えた場合の消波層両端の圧力差を計算し、前節で示した透水試験結果と比較した結果が図-3である。図中の白丸記号と実線で、管路内の流速変化に対する圧力差の実験と計算値を示す。両者はよく一致し、透水試験で求めた材料係数を用いた本数値計算モデルによって、消波層内の流体による圧や流体の運動が精度良く計算できることがわかる。

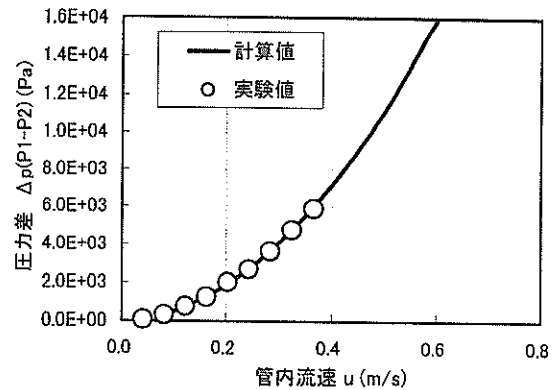


図-3 圧力損失計算値と実験値の比較

## 3. 最適構造に関する模型実験

### 3.1 実験模型の構成

図-4に本研究で提案する粒径の異なる消波層を組み合わせた長周期波対策護岸の模型の構成を示す。実構造物の設置水深を10~20mと仮定し、水槽での水深50cmから、その縮尺を1/40~1/20として模型護岸のサイズを決定した。水槽内でのケーソンの設置水深は50cmで、スリットの開口率は50%とし、遊水部の幅は40cmとした。ケーソンの背面にも同様のスリットを有し、その背後に総幅100cmの裏込め層(消波層)を設置した。消波層は4層に等分割し、ケーソンに接する層を粒径60mmとし、順次30mm、10mmと小さくしている。異なる粒径の砕石層を組み合わせるために、砕石は幅25cm、高さ70cmの小型金属籠に詰め、4個の籠を組み合わせさせて幅100cmの消波層を形成させた。波高計は護岸前面、遊水部、消波層内に設置した。

水路全体は、長さ52m、幅0.7mで一端の造波板から孤立波と周期4~8s(実機ではほぼ26~50s換算)の規則波を造波した。孤立波の反射率は、模型からの反射波が造波板へ戻ってくる前に造波を止め、水路内における波形変化から求めた。規則波は吸収制御機能を有する造波水路内で定常状態を2分間計測し、入反射波分離推定法で反射率を求めた。4層に分割した消波層には3種類の粒径の異なる砕石を組み合わせ用いた。

図-5は各実験ケースの粒径組み合わせの模式図で消波層幅は一定である。図-5においてCase-NおよびCase-0は、同一水路で実験をした文献中(平石・永瀬, 2003)のケースに相当し、それぞれ直立ベニヤ壁で消波層への流入をとめた完全反射型および一樣な粒径で消波層を構成した従来の護岸に相当する。消波層の粒径は、実験結果で比較的反射率が小さくなる $d_{50}=30\text{mm}$ を用いた。



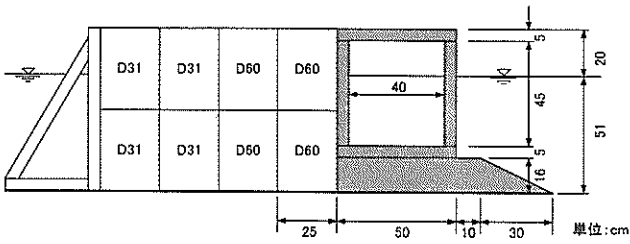


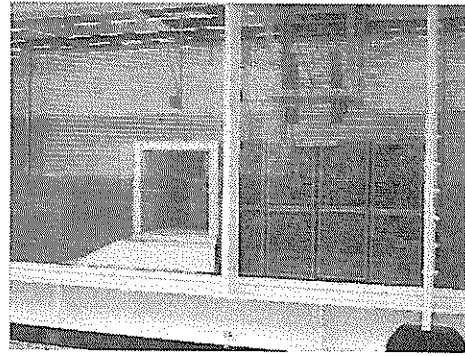
図-4 長周期波対策護岸の模型断面

Case-N	No Permeable			Slit Caisson
Case-0	d30			Slit Caisson
Case-1	d30	d60		Slit Caisson
Case-2	d7.5	d30	d60	Slit Caisson
Case-3	d30	d60	d7.5 d60	Slit Caisson
Case-4	d60	d30	d60	Slit Caisson

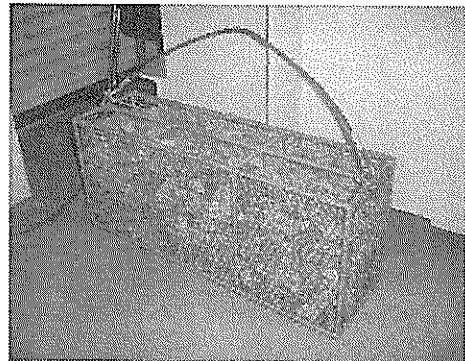
図-5 消波層内の粒径組み合わせ

図のCase-1~4は粒径を消波層内で変化させたもので、Case-1では荒い粒径からやや細粒径へ変化させ、Case-2では実験で使用できる最も細かい粒径まで変化させた。Case-3およびCase-4では、細粒径層を荒い粒径層で挟んでサンドイッチ構造としたもので、それぞれについて反射率を解析した。なお、スリットケーソンの直背後の消波層には、スリット空隙より粒径が大きい砂礫材を用いる必要があり、粒径の変更はしていない。前報では、粒径によって反射率が変化し最適粒径が存在することを示したが、消波層すべての粒径を変化させることはできないので、本研究では第一列より後の粒径を変化させて最適解を見つけようとしている。

写真-1に護岸模型を示す。木製の両面スリットケーソン模型背後に、幅25cmの4つの碎石籠が並んでおり、異なる粒径の碎石を詰めた碎石籠を組み合わせることによって、容易に消波層全体の碎石構成を変えることができる。なお、実験では碎石層の間に薄いステラシートによる被膜を詰めたケースも行ったが、結果に相違はなかった。



(1) 護岸模型全景



(2) 碎石収納用の籠

写真-1 長周期波対策護岸の実験模型

### 3.2 反射率の計測結果

図-6にCase-1の実験で観測した波高4cmの孤立波の波形を示す。図では、護岸前面を0として沖合へ距離x離れた4測点での波形を示す。P.1は、最も沖合の測点で、造波機から発生した孤立波が観測された後に、反射波が観測でき、容易に入射波高と反射波高の比を求めることができる。P.4は、護岸により近く、入射波形と反射波形が明瞭には分離できない。P.6はスリット遊水部、P.7は消波層内の測点で、入射波と反射波が重なって水位が上昇している。P.6とP.7を比較すると、消波層内のP.7の水位ピークが低い。これは、砂礫材で構成される透水層内で波エネルギーの減少が生じているためで、透水層の長さが長くなれば、長周期波の波高も減少していくものと予測できる。

図に示すように、造波中に反射波形が数回観測できるので、1波目と2波目の反射率 $K_r$ をP.1での入射波高と反射波高の比として求めて、その平均値を対象ケースの反射率と

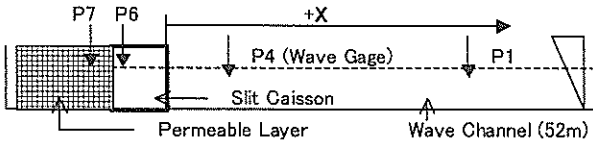
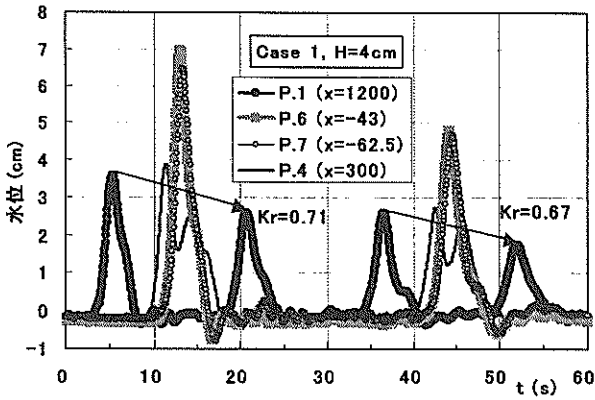


図-6 消波護岸前面で観測された孤立波の波形変化

表-2 測定反射率の一覧

	T=2s	T=4s	T=6s	T=8s	Solitary
H=2cm					
Case-N	0.72	0.85	0.81	0.80	0.96
Case-0	0.29	0.47	0.65		0.93
Case-1	0.20	0.44	0.60	0.67	0.68
Case-2	0.12	0.55	0.64	0.72	0.74
Case-3	0.31	0.69	0.65	0.73	0.77
Case-4	0.18	0.52	0.62	0.66	0.69
H=4cm					
Case-N	0.68	0.89	0.81	0.80	0.94
Case-0	0.26	0.52	0.63		0.94
Case-1	0.17	0.49	0.58	0.67	0.69
Case-2	0.14	0.56	0.62	0.69	0.74
Case-3	0.28	0.71	0.65	0.72	0.79
Case-4	0.19	0.55	0.58	0.66	0.70

して整理した。表-2に、規則波のケースも含めて、実験反射率の一覧を示す。

図-7は、消波層無しおよび一様粒径の従来型と改良型の基本形における反射率を比較したものである。波高 $H_{1/3}$ は4cmとした。消波層がない場合(Case-N)は、T=2sを除くと反射率は0.8以上になる。これに対して、長周期波対策護岸として消波層を取り付けると、孤立波を除くと、全周期帯で反射率は0.7以下になり、長周期波対策護岸の反射率が低いことが判る。一様粒径(Case-0)と改良型(Case-1)を比較すると、改良型の方が全周期帯において反射率は小さくなる。特に、孤立波のケースでは粒径を組み合わせた改良

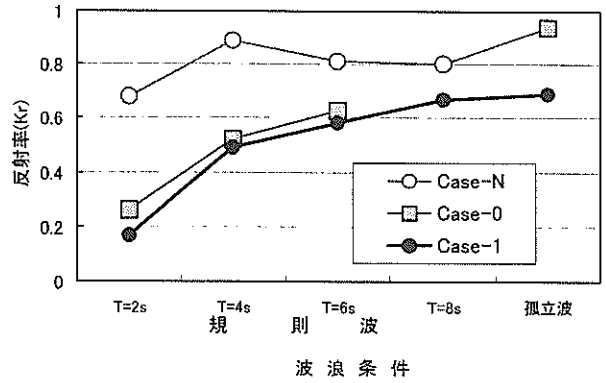
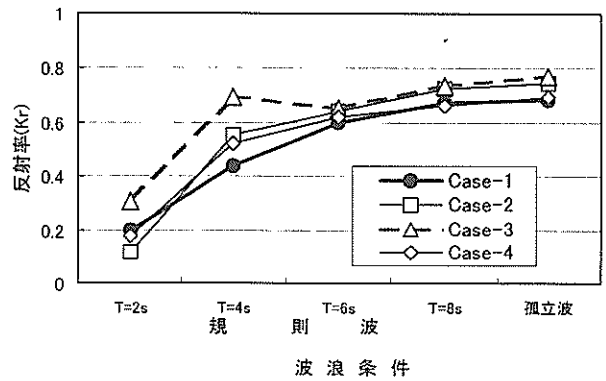
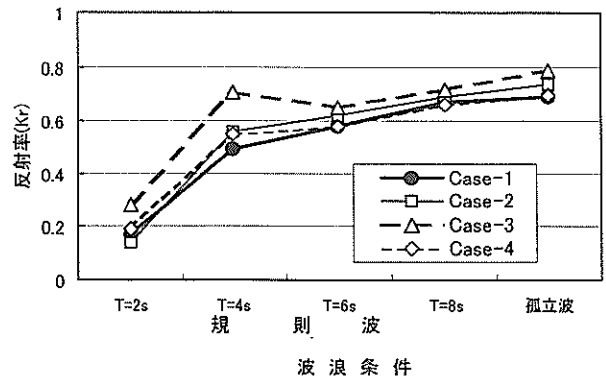


図-7 不透過および一様粒径消波層との比較



(1) 波高2cmの場合



(2) 波高4cmの場合

図-8 改良型護岸の実験反射率の比較

型を使用することで、反射率を0.7以下にすることが可能となる。図-8は、改良型について反射率を比較したもので、(1)および(2)は波高 $H_{1/3}=2$ および4cmに相当する。図-8から波高が異なっても反射率はほとんど変化せず、Case-3を除くと、他のケースの反射率はほぼ同じになることがわかる。これは、Case-3は中間に細粒径層を含んでおり、細粒径層自体が不透過層に近い性質を有しているために、有

効消波層長が比較的短くなったためと考えられる。T=2sではCase-2、T=4sではCase-1、Tが6sより長くなるとCase-1とCase-4が最適になる。したがって、今回の実験範囲ではd=30~60mmが最適粒径となり、それらを適切に組み合わせると一様粒径より反射率を低くできる。

以上の結果から、現地の護岸で反射率0.7を達成するためには、異なる粒径の碎石層を組み合わせる最適化を図れば、消波層の長さは1/40縮尺を仮定すると40m確保すればよいことになる。

#### 4. 数値計算による適用性の検討

##### 4.1 模型実験による検証

ここでは、数値波動水路の一端に消波層を持つ長周期波対応護岸を設置した場合の長周期波反射率を計算した。反射率は、沖合の波形から設定できる入射孤立波の頂部水位と反射孤立波の頂部水位の比で定義した。

図-9に中央粒径30mm粒径の一様なケースと、今回実験を行ったCase-1での反射率の比較を示す。反射率Krの実験値と計算値は、ほぼ一致しており、透水試験で求めた材料係数を用いて圧力損失をモデル化した流体直接解析法による長周期波変形計算用の数値波動水路の妥当性を示すことができた。

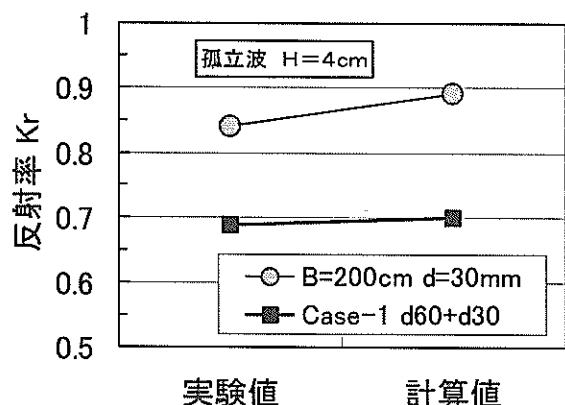


図-9 一様および異種粒径消波層の反射率

##### 4.2 現地への適用性評価

模型実験で検討した結果から、長周期波対策護岸の消波層では、粒径一様の碎石で構成するよりも、荒い粒径とやや細かい粒径を組み合わせることにより反射率が低くできることが判った。ここでは現地スケールによる数値解析で、改良型消波層の適用性を確認した。模型実験では、Case-4のサンドイッチ構造と荒い粒径と細かい粒径の層を組み合わせたCase-1が、やや有効になったが、大きな変化は見ら

れなかったため、Case-1およびCase-4に代表される改良型の適用性を数値解析で調べた。

本模型実験は1/40縮尺と仮定すると、数値解析ではスリットケーソン前面水深が20mになる。入射条件として波高1.0mの孤立波を作用させた。材料係数は透水試験のNo.1およびNo.2碎石の平均値として $\alpha_0=10^4$ 、 $\beta_0=3.3$ を用いた。No.3碎石は他の粒径と材料係数が異なるため、丸い実験用の玉石は、現地碎石と異なる性質を有するものと考え、平均下の作業からは除外した。現地の碎石粒径は、40cmと80cmとした。スリット直背後に80cmの碎石を設置するとスリット空隙からの碎石落下を防ぐ効果がある。消波層長は50mとし、25mずつd=80cmとd=40cm碎石を用いたケースをCase-p1、50mの中で前と後の12.5mだけd=80cmを採用し、中央部の25mをd=40cmで充填したケースをCase-p2とする。図-10に現地スケールで表した改良型の長周期波対策護岸を示す。

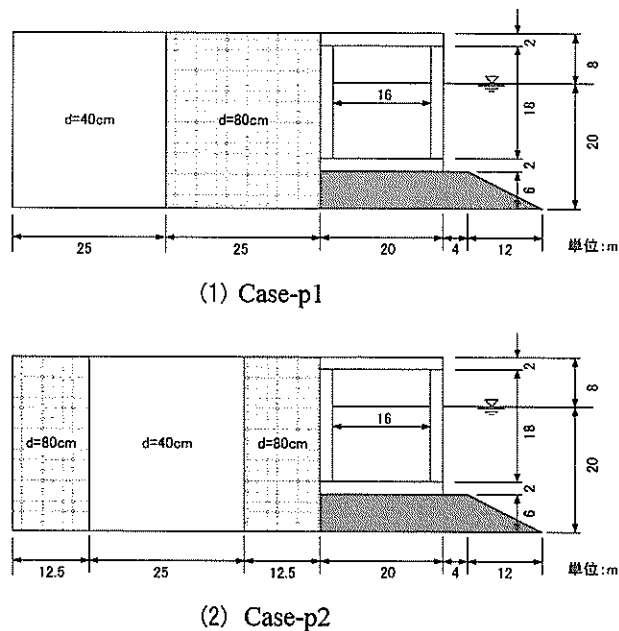


図-10 改良型長周期波対策護岸の断面

図-11は、Case-p1での計算波形を示したものである。図中のxは、護岸前面からの沖合への距離である。図から入射および反射孤立波の最高水位の比を反射率として定義するとKr=0.71である。Case-p2ではKr=0.70となり、計算ではサンドイッチ構造にすると、反射率を若干小さくし、長周期波対応護岸の適用性をより高めることができる。

なお、実験結果を1/40で現地に換算すると、透水層の幅は最小で40mとなるが、数値計算では遊水室を含む構造に関する実験例(池野ら, 2004)などと比較できるように、透水層幅を50mとした。本計算手法を用いれば、現地で長周期波対策護岸を設計するときに、使用碎石粒径と消波層幅

を入力することにより反射率を推定することができ、現地で調達できる材料を用いた最適な構造を検討することができる。

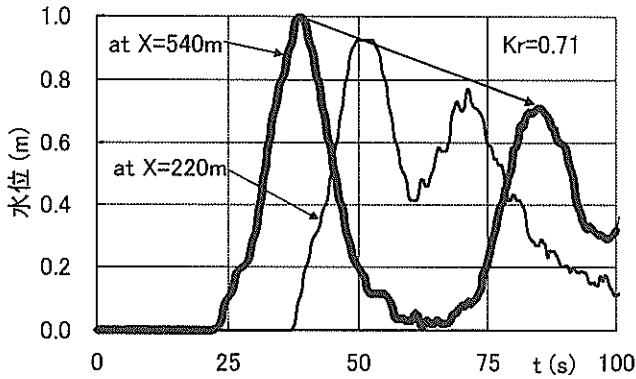


図-11 改良型護岸前面での入射波形と反射波形

## 5. 長周期波対策護岸の活用事例

### 5.1 長周期波対策護岸の活用

長周期波対策護岸は、港内で長周期

波が反射されるような場所へ適切に配置されることが望ましい。設置場所としては、港奥の遊休岸壁や港口部に近く、直接港口部から眺めることができる護岸が適している。あるいは既存の防波堤の港内側を幅の広い消波帯とすることで、より安価に港内での長周期波の増幅を防止することが可能である。

図-12には、防波堤の港内側を消波層としたイメージ図を示す。消波層の材質は、砂礫材が望ましいが、波浪による安定性が確保できない場合には、小型の波消しブロック層を造ることによって同様な効果が期待できる。

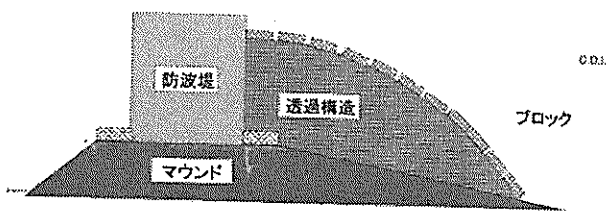


図-12 防波堤港内側に幅広消波層を設置するイメージ

長周期波対策護岸の主な目的は、港内で係留された船舶の動揺を抑制することにあるので、実際に船体動揺がどの程度軽減できるかを検討しておく必要がある。ここでは、対象とする岸壁そのものが長周期波対策用の構造を有する場合を仮定した。

前章までに、長周期波の反射率を低下させる護岸構造を提案し、その前面波高分布は模型実験と数値解析で明らかにした。ただし、実際の船体動揺がどの程度低減されるのかについて評価はなされていない。本省では船体動揺量の計算を行い、長周期波対策を目的とした岸壁による荷役稼働率改善効果を推定した。また、長周期波対策護岸を港奥に設置した場合の港内波高の変化をモデル港湾で検討した。ただし、両ケースでの計算例は、ある特定の条件で試算したもので、検討手法を示しているものの一般的な結論を議論するには至っていない。

### 5.2 岸壁構造への活用例

#### (1) 岸壁構造の改良案

著者ら(平石ら, 2003)は、港湾の長周期波対策工の適用性を検討するために荷役稼働率での定量的評価を提案し、港内の長周期波反射率が0.7以下になると、荷役稼働率で改善効果が表れることを示している。そして、岸壁や護岸の長周期波反射率を低下させるために、二重スリットケーソンの裏込め部にも波を透過させ、砂礫層でのエネルギー損失を活用する長周期波対策護岸・岸壁の反射率を模型実験

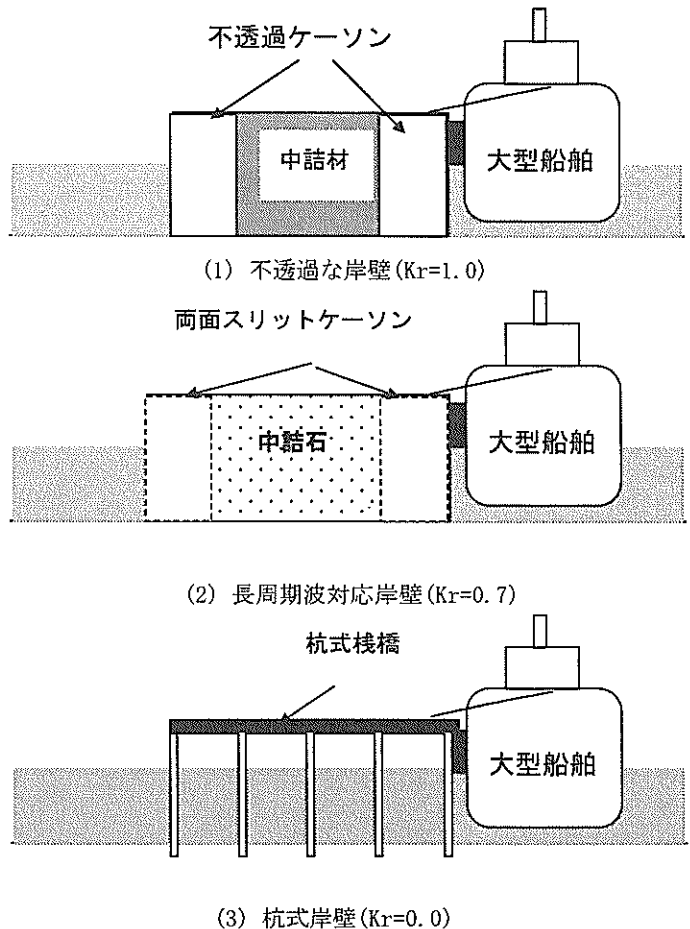


図-13 従来型の岸壁と長周期波対応岸壁の構造

と数値解析で検討してきた。その結果、幅50mの適切な粒径を有する消波層を用いれば、反射率を0.7以下にできることが示した。そこで、設計で用いる値として、ここでは長周期波対策護岸・岸壁の反射率を0.7とする。配置場所についても、できるだけ最小の改良で最大の効果を有するように決定すべきであるが、ここでは、簡単のために船舶が係留されている岸壁を長周期波が吸収されるように改良することを検討した。

岸壁長が短い場合には、船体が岸壁を塞いでしまうので、船体から直接反射される波が港内での波の場を変化させる可能性があるが、ここでは岸壁長を無限大として、係留船舶によって港内の波の場は乱されないものと仮定している。また、岸壁の水深は十分深く、船体を係留することによって、岸壁そのものが船体によって遮蔽されることは考えていない。なお、係留船舶の動揺特性は初期張力や防舷材の反力特性、船体の載荷状態や風の影響で複雑に変化するもので、本事例だけで長周期波対策護岸の岸壁への活用の是非を議論することはできない。ここでは、ある特定の条件での試算結果のみを示していることに留意願いたい。

(2) 船体動揺計算の内容

図-13に本研究で対象とした岸壁の構造を示す。図中の(1)は不透過な壁体を用いた直立岸壁で、長周期波に対する反射率 $K_r=1.0$ である。図の(2)は、中詰材まで波を浸透させた長周期波対応型岸壁で、 $K_r=0.7$ とした。図(3)は比較のために、沖合ドルフィンなどで用いられる栈橋式岸壁で背後陸地からの反射波は無く $K_r=0.0$ とした。

本研究では、荷役障害から受ける被害が家庭の電気使用に直接影響を与える石炭船専用バースでの係留について検討した。図-14は対象とする50000DWTの石炭船の係留状況を示す。船体のモデル化は、標準船型を用いて行った。標準船型を定める船体諸元を表-3に示す。表中の数値は船体の形状と大きさを規定する数値で、各パラメーターに対応

する船体諸要素の図示は、文献(小山ら, 1997a)等を参照できる。作用する波は、港内波高を想定して有義波高0.1mのうねり・長周期波とし、有義波周期を10s~50sで変化させた。波はBretschneider・光易型の周波数スペクトルを有する一方不規則波で、入射波向は、岸壁に直角に入射する向きを0度として、0, 45, 90度とした。船体の係留方向と波向きの関係を前述の図-14に示す。図のA~Hは係船索の配置を示し、標準的な係留方式を参考に、船体の前後にそれぞれ4本のナイロン製ロープを使用するものとした。また、波向は、岸壁に直角に入射する方向を0度としている。本計算では、船体のサージング方向の付加質量を船首および船尾側からの波について区別していないので、船首側から波が入射しても、図の波向き90度のケースと同じ計算結果になる。

表-3 標準船型の必要パラメーター

項目		係数	単位
積載重量トン数	DWT	50,000	(ton)
垂線間長	Lpp	210.66	(m)
船体中央幅	B	31.06	(m)
船体中央喫水	D	13.4	(m)
中央断面係数	-	0.9745	-
排水量	-	59,529.86	(ton)
船底からの重心(G)位置	KG	11.38	(m)
メタセンター高さ(Roll)	GMT	2.2	(m)
" (Pitch)	GML	264.591	(m)
横揺慣動半径	kxx	10.87	(m)
縦揺慣動半径	kyy	52.67	(m)
船首揺慣動半径	kzz	52.67	(m)
浮心位置	-	0.175	(%)

検討に用いる係留索は、対象船型から設定できる標準ナイロン索とし、索径を90mmとした。係船柱の位置は大型船を想定して40mとし、一般的に船舶が所有する8本の係留索を、このいずれかに索取りするものとし、係船柱以外に増索はしない。図-15にナイロン索の伸び率と張力の関係を示す。近似的には、船体のサージング方向の固有周期は、近似的に次式で示される。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{2K}} \tag{5}$$

ここで、 $M$ は船体の仮想質量で、載荷重量トンの1.1~1.3倍である。 $K$ は前後方向への係船索の合成伸び特性である。合成伸び特性は係船索長、初期張力およびサージング方向

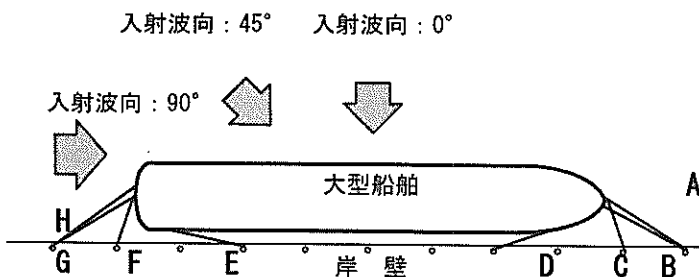


図-14 船体の係留状況と作用波の関係

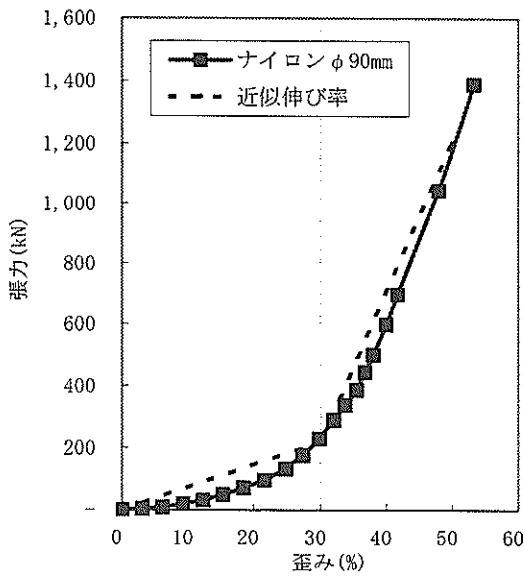


図-15 ナイロン索の伸び特性

表-4 サージング運動の近似固有周期

索長40m	載荷重量トン(DWT)	
緩く係留	10000	50000
張力200kN 伸び30%	119s	267s
きつく係留	10000	50000
張力1000kN 伸び20%	44s	97s

への有効索本数で決定される。

いま、初期張力を0とし、図-15の点線で示すような平均伸び率を係留索は有しており、有効索本数を1～3本とする。載荷状態によって仮想質量 $M_i$ は変化する。ここでは3～5×10<sup>7</sup>kgで変化させた。表-4に近似式から求められる

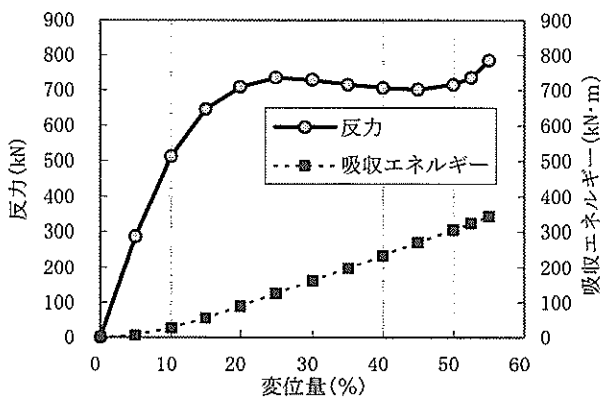


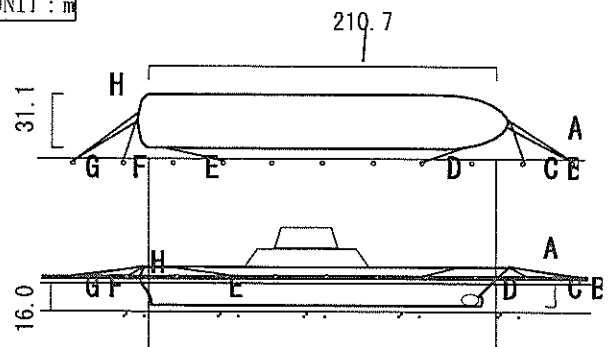
図-16 モデル化した防舷材の反力特性

サージング運動の固有周期を示す。固有周期は、港湾で対象とする長周期波の周期波範囲とほぼ等しく、大型の石炭船はうねりや長周期波の侵入によって共振しやすいことが判る。

つぎに、防舷材の設置間隔は、対象が大型船であることを考慮して15mピッチとした。防舷材のタイプは定反力型である。図-16に検討に使用した標準的な防舷材の反力特性を示す。変位が大きくなるほど吸収できるエネルギーは大きい。

図-17は係留索、防舷材および係留索の索取り位置を示す。係留索は前述のようにAからHで記号を付ける。サージング方向の運動は主にA、B、GおよびHで抑止し、索長を40mとした。係留索DおよびEは、運動抑止のために増索したもので長さは、それぞれ30mおよび40mである。係留索CおよびFは主にスウェイング運動に対応するもので、長さは30mである。

UNIT : m



載荷総トン数 : 50,000DWT 係留索 A : L=40m 係留索 E : L=40m  
 垂線間長 : 210.66m 係留索 B : L=40m 係留索 F : L=20m  
 船体中央幅 : 31.06m 係留索 C : L=20m 係留索 G : L=40m  
 船体中央喫水 : 13.40m 係留索 D : L=30m 係留索 H : L=40m

図-17 係船柱、防舷材、係留索の取り付け点

船体動揺解析には、ストリップ法（たとえば、山本ら、1997）を用い、6自由度の非線型運動方程式を時間ステップ毎にルンゲクッタ法で解いていく手法を用いるものとし、プログラムは、(株)三井造船昭島研究所製の係船動揺解析システムMOSQ2（島田ら、2002）を用いた。計算では、船体の断面毎の2次元流体力を特異点分布法（小山ら、1997b）で求め、船長方向に積分して3次元流体力とした。波浪強制力は、入射波スペクトルに規則波の強制力を掛けた線形重ね合わせ法によって計算する。変動波漂流力はHsuの手法（Hsuら、1970）に従った。運動方程式をマトリックス表記すると次のようになる。

$$(M+A)\ddot{X}+B\dot{X}+CX+D+T=F_E+F_D \quad (6)$$

ここで $M$ :船体質量マトリックス,  $A$ :付加質量マトリックス,  $B$ :造波減衰力係数マトリックス,  $C$ :復原力マトリックス,  $D$ :相対速度の2乗に比例する抗力のベクトル,  $T$ :係船張力マトリックス,  $F_E$ :線形の波浪強制力,  $F_D$ :変動漂流力である. 流体力は周波数の関数になるので運動方程式を厳密に解くためには時間領域でのたたみこみ積分が必要になるが, 計算が複雑になるので, ここでは作用する波の代表周波数で固定した係数を用いている.

計算でのタイムステップは0.5s, 全計算時間は3600s, 船体の初期位置は $x,y,z$ 方向ともに0とした. また長周期の運動に関して減衰を与えるスウェイング運動減衰係数を $0.019\text{kN}\cdot\text{s/m}$ , サージング運動減衰係数を $5.0\text{kN}\cdot\text{s/m}$ とした(笹ら, 1999). そして, 6自由度の運動に対する方程式を時間ステップ毎に解いて, 船体重心のサージング, スウェイング, ヒービング, ピッチング, ローリングおよびヨウイング変位を求め, 統計解析によって動揺振幅の有義値等を計算した.

### (3) 船体動揺計算の結果と考察

船体の荷役可否判断は, 動揺振幅と石炭運搬バケット等の動揺許容限界から設定される荷役限界動揺振幅を比較することによってなされる. 荷役に危険を及ぼす限界の動揺振幅の有義値を荷役限界動揺量とする. 前述の“港内長周期波影響評価マニュアル”では, 表-5のように船種毎に荷役限界動揺量を設定している. 石炭運搬専用船の荷役限界動揺量は示されていないので, 上田ら(1983)が示した値を基に採用された一般貨物船の荷役限界動揺量を用いる. 一般貨物船に比べて, 石炭荷役時には, 専用バケットを使用しているため, 動揺限界量は小さくなる. 東京電力常陸那珂石炭火力発電所専用岸壁でのヒアリングによると, ±

0.5mをサージングについては安全基準としており, 安全基準を超えるような船体動揺が生じると実際は荷役作業を中止する. そこで, サージングについては表-5の数値を限界量とし, その1/2を安全許容量とする.

図-18に通常の直立岸壁(反射率 $K_r=1.0$ )の場合の波周期に対する船体動揺の有義振幅の変化を示す. 入射波高が0.1mで小さく, 遮蔽された港内ではヒービング振幅は小さく, ヒービング動揺で荷役に支障をきたすことはない.

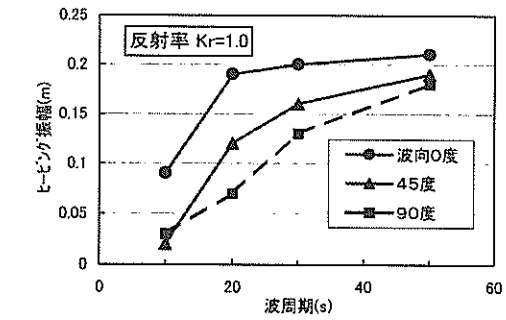
スウェイングは限界動揺量以下であるが, 波向が45および90度のときに長周期波作用時に危険側になる. これは, 次に述べるサージング動揺に練成した運動と考えられ, スウェイングについては波向と周期だけで決まるものではなく, サージング動揺との関係も議論する必要がある.

サージング振幅は, 波周期が長くなると, 入射角が45および90度の場合に顕著に振幅が大きくなり, 荷役が困難になることがわかる. 長周期波に対しては, サージング動揺が最も強い影響を受け, 本計算の条件では, 50sを有義波周期とする長周期波が作用すると, 波高の10倍以上の振幅で動揺する. この大きいサージング動揺により(2)のスウェイング振幅も長周期波側で大きくなる現象が現れている. なお, 係留係のサージング方向の固有振動周期は約100sなので, 長周期波の作用により顕著な共振現象は生じないが, 本計算では長周期波のエネルギー分布をBretschneider-光易型で与えているために, ピーク周期より長い周期帯の長周期波エネルギーによってサージング動揺が励起されている.

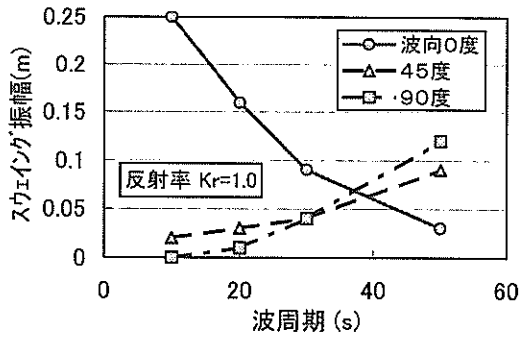
図-19は, 長周期波によるサージング振幅の増大を抑止する目的で岸壁の反射率を低下させた場合の動揺振幅を示す. 波向が90度の場合には岸壁反射率が変化しても岸壁前面波高は変化しないので, 動揺の改善効果は計算では生じない. 波向45度の場合には,  $K_r=0.7$ で動揺はやや小さくなり,  $K_r=0$ のときは50%以下に小さくなる.

表-5 標準的な荷役限界動揺量

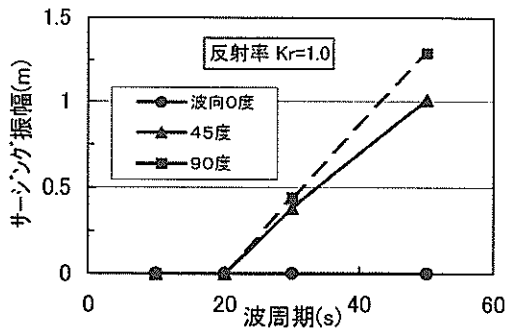
	動揺成分					
	サージング (m)	スウェイング (m)	ヒービング (m)	ローリング (°)	ピッチング (°)	ヨウイング (°)
一般貨物船	±1.0	+0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
穀物運搬船	±1.0	+0.50	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
鉱石運搬船	±1.0	+1.00	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
タンカー(内航)	±1.0	+0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
タンカー(外航)	±1.5	+0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5
コンテナ船	±0.5	+0.30	±0.3	-	-	-
ロールオン・ロールオフ船	±0.3	+0.20	±0.1	-	-	-
自動車運搬船	±0.3	+0.20	±0.1	-	-	-



(1) ヒービング振幅



(2) スウェイング振幅



(3) サージング振幅

図-18 波周期による船体動揺量の変化

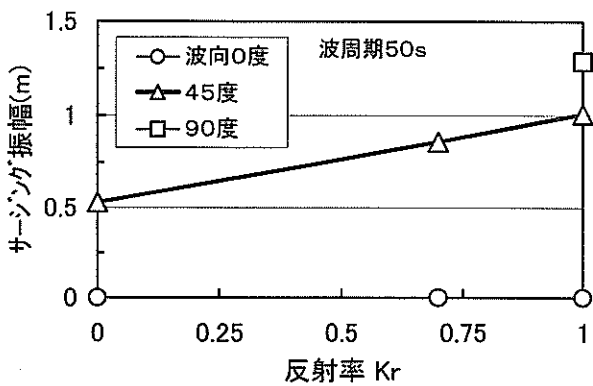


図-19 岸壁反射率によるサージング振幅の変化

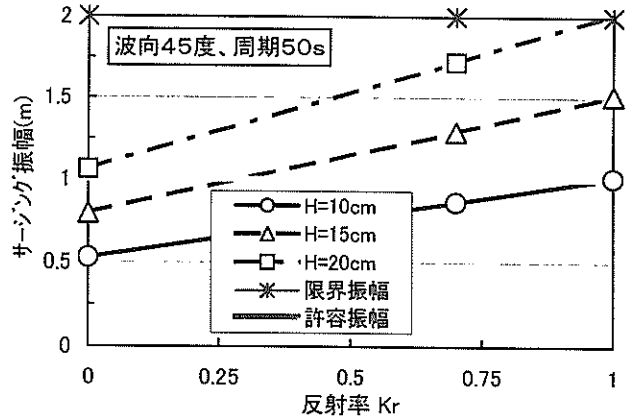


図-20 入射波高によるサージング振幅の変化

図-19の計算例から判るように、特定の計算条件でサージング動揺量が多い場合を設定すると、岸壁構造の改良による動揺量の低減率が定性的に推定できる。ただし、現地での長周期波は港内で多重反射を生じ、波向を特定できない場合が多いと考えられるので、本計算結果を参考にする場合には、現地での波向に関して十分考察しておく必要がある。

図-20は入射波の波高が大きくなった場合のサージング振幅の変化を調べたものである。港湾計画において岸壁前面の許容長周期波高は10~20cmとされ、 $H=20\text{cm}$ が設定される場合がある。この場合には、 $K_r=1.0$ で振幅が2mを越え、サージング振幅は限界値以上になる。一方、 $K_r=0.7$ となる長周期波対応岸壁では、サージングは限界動揺量を超過することは防止できる。さらに、 $H=10\text{cm}$ まで港内波高を小さくすると、 $K_r=0.7$ を採用すればサージング振幅は許容動揺量以下になり、本計算条件では安全といえる。現地での適用には、計算条件を適切に与える必要がある。

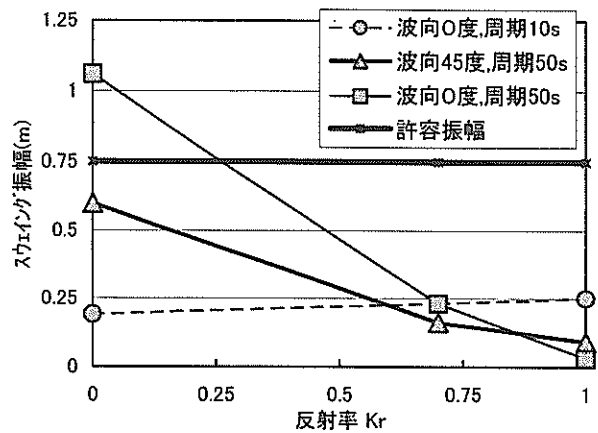


図-21 反射率によるスウェイング振幅の変化



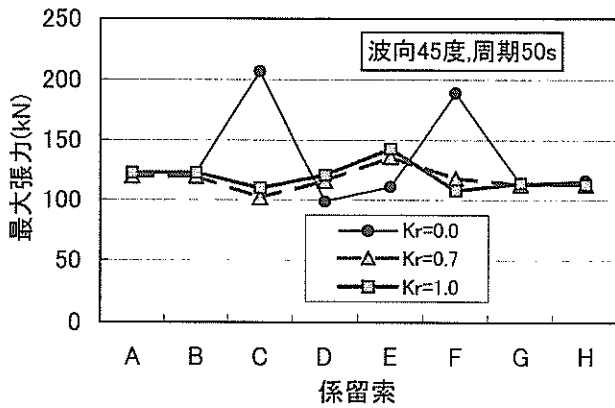


図-22 係留索に作用する最大張力

次にスウェイングの動揺量を調べる。図-21にスウェイング有義振幅の変化を示す。スウェイング振幅は、長周期波が作用しても許容値以下である。ただし、杭栈橋式岸壁 ( $Kr=0.0$ ) の場合には、波周期が長くなると振幅が許容値を超えてしまい荷役ができない。したがって、長周期波対策岸壁 ( $Kr=0.7$ ) は、斜め入射波に対してスウェイング振幅を低減できる効果を有している。また、周期10sのうねりに対しても、スウェイ振幅を低減させ、より安全な荷役を可能とでき、大型船の荷役岸壁の構造形式として採用できる。

本計算例では、反射率が小さくなり栈橋式に効果が一致すると、スウェイ振幅が大きくなる場合がありことが示されているが、岸壁に取り付ける防舷材反力特性によってスウェイング動揺は大きな影響を受けるため、本計算結果は一般的な結果を示しているわけではなく、本計算条件での試算例であり、定量的なスウェイング動揺量の変化を推定するためには、数多くの計算条件を設定して検討を進める必要がある。本研究では、一例しか示していないので、今後も研究課題として取り扱っていくものである。

図-22は、波向き45度、波周期50sの場合に係留索A~Hに作用する最大張力を示したもので、このケースでは許容値を超えておらず、切断の危険性は小さい。しかし、 $Kr=0.0$  のときは、船舶のスウェイング方向の運動を抑えるために、船体から直角に岸壁へ張られている係留索CおよびFの張力が他の索よりも顕著に大きくなる。これは、スウェイング振幅の増大によるもので、作用する索張力が不均一になると1本の索に力が集中し、切断の危険性が高くなる。 $Kr=0.7$  と  $Kr=1.0$  の場合を比較すると、 $Kr=0.7$  の場合に係留索張力が全般にわたって低減しており、特定の索に張力が収集している現象は表れない。したがって、岸壁を改良して適切な反射率を持つようにすると係留索に作用する張力も均等に小さくなり係留の安全性が高まる可能性がある。

### 5.3 港内での長周期波対策護岸活用例

#### (1) モデル港湾と計算の条件

次に、港内に長周期波対策護岸を設置した場合に、長周期波高がどのように変化するかを数値計算で調べた。船舶が係留される岸壁は港奥部に位置することが一般的であるので、長周期波対策護岸も、なるべく港奥部に設置した港奥部の波高を低減させることに適していると考えられる。そこで、長周期波による荷役障害が報告されている実際の港湾地形をモデルとして、港奥部の長周期波対策護岸の効果を数値解析で検討した。

数値計算で用いるモデルは港湾空港技術研究所開発の非線形波浪変形モデルNOWT-PARI(平山, 2002)である。入射長周期波は、風波と同様にBretschneider-光易型の周波数スペクトルと光易型の方向関数(合田ら, 1975)を有するものとし、有義波周期は60sおよび90sとした。これは、対象とした現地で観測された長周期波のスペクトル形が二山型に近く2つのピークを有することが多いためである(平石ら, 1998)。波高計算は、2つの主波向について60sおよび90sのそれぞれの周期で波高を計算し、入射波高に対する港内の長周期波高の比として波高比で整理した。その他の計算条件を表-6に示す。

表-6 モデル港湾での長周期波高計算条件

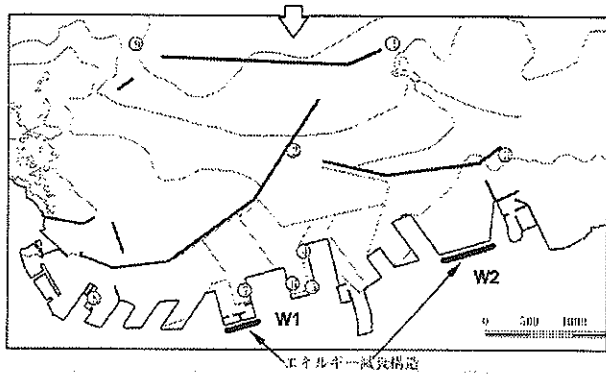
項目	設定値	項目	設定値
計算格子間隔	20m	碎波の考慮	なし
長周期波高	20cm	底面摩擦係数	0.02
長周期波周期	60s, 90s	計算時間間隔	1s
成分波数	500	緩造波時間	60s
方向集中度	75	有義波計算	15min
最小周期	1s	総計算時間	30min
沖側水深	45m	最小水深	7m

図-23は、モデル港湾の地形と長周期波対策護岸設置位置を示す。主波向は、図に矢印で示し、(a)および(b)は現地では、それぞれSEおよびSSEに相当する。長周期波対策護岸は、図中のW1およびW2の位置に対応する直線全延長にわたって設置するものとし、反射率は0.7とした。長周期波対策護岸の効果を比較するために次の3つのケースについて港内波高を計算し、沖側の入射波高の比として波高比を求めた。なお、計算は60sと90sについて行っており、ここでは、両者の結果を平均した波高比を用いて、長周期波対策護岸の効果を推定することにした。

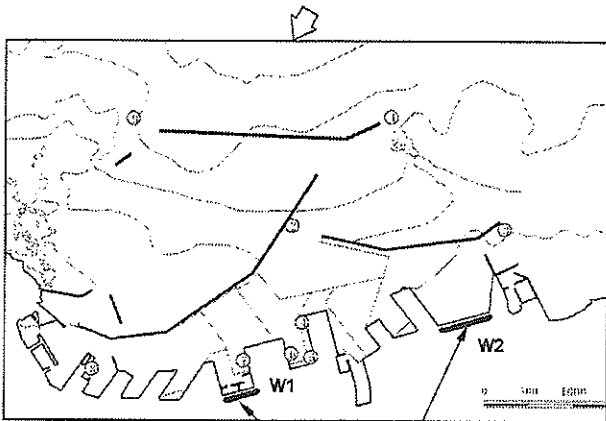
地形1：長周期波対策護岸を設置せず、港内の反射率はすべて1.0とするケース。

地形2：W1のみに長周期波対策護岸を設置したケース

地形3：W1およびW2の両護岸の反射率を0.7としたケース。



(a) 波向SE



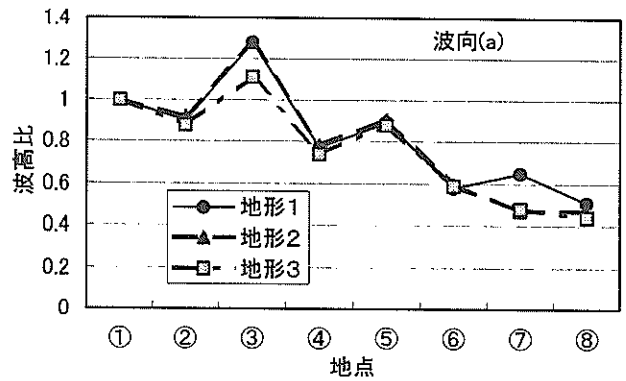
(b) 波向SSE

図-23 モデル港湾での長周期波対策護岸の設置例

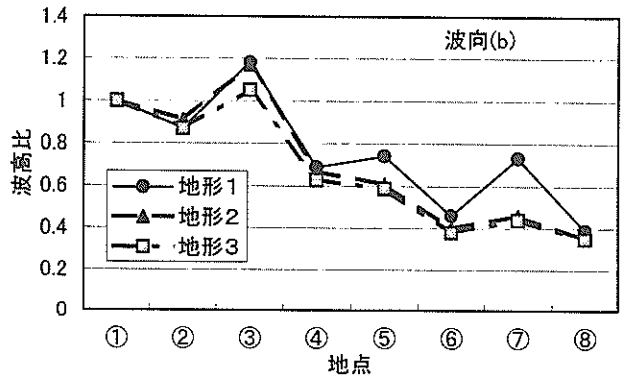
(2) 対策護岸による長周期波高比の変化

図-24に平均波高比の計算結果を示す。図の横軸の地点は図-23での丸数字で示される港内の波高計算地点に相当する。波向SEの場合には、W1護岸前面の⑦で地形1に比べて地形2および3での波高比が小さくなっている。その比率は、地形1の波高比に比べて約27%である。また、図では右側の開口部に近い③でも、地形3の場合に波高比が13%小さくなっている。

波向がSSEの場合にも、地形2および3を設定すると、⑦の岸壁で波高比を最大で40%低減させることが可能である。中央部の④、⑤、⑥に位置する岸壁でも波高比は低減しており、直接長周期波対策護岸が設置されていない地区においても、波高低減の効果が及んでいる。このように港奥部の遊休岸壁などを適切に改良して、長周期波に対する反射率を0.7程度に低下させておけば、港内全域において長周期波の波高が低減し、荷役障害の防止に寄与することができる。本計算例は、特定の地形条件での試算例であり、現地の港湾計画と関連を有するものではないが、今後、各地の港湾で長周期波対策護岸の設置が検討されれば、荷役作業



(1) 波向(a)SE



(2) 波向(b)SSE

図-24 モデル港湾における地形による波高比変化

の効率が上昇し、運送コストの縮減につながると思われる。

6. あとがき

本研究では、まず模型実験によって長周期波の反射率を最も低下させることができる長周期波対策護岸の最適構造を検討した。その結果、粒径の異なる碎石層を組み合わせた消波層を有する改良型長周期波対応護岸が、同一の粒径だけで構成される消波層を有する護岸より最適であることが判明した。その中でも、粒径60mmから順次消波層内の粒径を小さくしたタイプおよび消波層の中央部に小さな粒径の層をはさんだサンドイッチ構造がより適切であることが明らかになり、反射率0.7が達成できた。

また、透水試験を実施して流体直接解析法で用いる材料係数を決定し、現地での護岸適用性を検討できる数値モデルを確立した。本研究で確立した計算手法は、現地で長周期波対策護岸を設置する場合の反射率推定に活用することができる。

次に、長周期波対策用の護岸構造を現地で活用できる事例として、岸壁構造の改良を検討し、6自由度の船体動揺計算を行って岸壁の反射率改善効果が船体動揺に及ぼす影

響を調べた。特定の計算条件での限られた計算結果であり、一般的な結論は導くことができなかつたが、岸壁の低反射化がサージング振幅の現象に寄与できることが予想された。同様に定反射構造に改良することによって、斜め入射時にスウェイングとサージングの振幅を低減することができることが判明した。

最後に、モデル港湾の港奥部に長周期波対策護岸を配置した場合の長周期波港の変化を数値計算で調べた。得られた波高比の変化から、長周期波対策護岸は港内全域で長周期波波高を低減させることが可能であると推定できた。

## 謝辞

本研究で用いた流体直接解析法の計算においては、(株)フジタ技術センター永瀬恭一氏のご支援を受けた。船体動揺計算の実施に関しては、(株)日本海洋コンサルタント国栖浩二氏のご助力を受けた。長周期波に対する船体動揺抑制の手法については、当所地盤構造部長白石悟ならびに海洋構造研究室長米山治男から数々の助言を頂いている。上記の皆様深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 池野勝哉・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩(2004) : 長周期波を対象とした直立消波構造物の開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 731-735.
- 上田茂・白石悟(1983) : 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告, Vol. 22, No. 4, pp. 181-218.
- 沿岸開発技術研究センター(2004) : 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 21, 86p.
- 合田良実・鈴木康正(1975) : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 155, 33p.
- 小山健夫・藤野正隆・前田久明(1997a) : 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 1-36.
- 小山健夫・藤野正隆・前田久明(1997b) : 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 66-79.
- 近藤淑郎・竹田英章(1983) : 消波構造物, 森北出版, 275p.
- 笹健児・白石悟・榊原繁樹(1999) : 係留船舶の長周期動揺の各種計算法による再現性に関する比較検討, 港湾技研資料, No. 931, 80p.
- 島田潔・丸山文生(2002) : メガフロートに作用する変動漂流力モーメントの特性について, 日本造船学会論文集, 第192号, pp. 319-323.
- 平石哲也・河野信二・片山裕之・松島三郎(1998) : 鹿島灘における長周期波の出現頻度と荷役稼働率について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 316-320.

- 平石哲也・永瀬恭一(2002) : 流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討, 海工論文集, 第49巻, pp. 686-690.
- 平石哲也・永瀬恭一(2003) : 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 801-805.
- 平石哲也(2004) : 長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算, 港空研資料, 印刷中
- 平山克也(2002) : 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1036, 162p.
- 山本善之・大坪英臣・角洋一・藤野正隆(1997) : 船体構造力学, 成山堂書店, pp. 176-185.
- CIRIA(Construction Industry research and Information Association)(1991) : Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, pp. 67-182.
- Hsu, F. A. and K. A. Blenkarn(1970) : Analysis of peak mooring force by slow vessel drift oscillation in random seas, Proc. OTC, No. 1159, 10p.

## 記号表

$B$	: 砕石による消波層の長さ
$d$	: 消波層の粒径
$d_{50}$	: 中央粒径
$d_o$	: 代表粒径
$F$	: 多孔質体に作用する流体力
$f$	: 波の周波数
$H$	: 規則波高
$H_I$	: 入射波高
$H_R$	: 反射波高
$H_{1/3}$	: 有義波高(風波成分)
$H_{\ell 1/3}$	: 有義波高(長周期波成分)
$H_{\ell c 1/3}$	: 荷役限界長周期波高
$K_r$	: 反射率
$T$	: 規則波周期
$T_{1/3}$	: 有義波周期(風波成分)
$T_{\ell 1/3}$	: 有義波周期(長周期波成分)
$t$	: 時間
$u$	: 水平流速
$v$	: 2成分流速計でのy成分流速
$X$	: 護岸表面からの水平距離
$\Delta t$	: 計算時間間隔
$\delta$	: ケーソンスリット開口率
$\varepsilon$	: 多孔質体の空隙率
$\mu$	: 粘性係数
$\rho$	: 流体密度

$\theta$  : 波向  
 $\theta_p$  : 主波向